미래 기후변화를 고려한 보령댐 비상도수시설 운영방안 연구

Boryeong Dam Emergency Water Diversion Facility: Ensuring Operational Flexibility and Resilient Response to Climate Change

임건목* · 노선희** · 손민우*** · 정관수****

Lim, Gunmok*, Noh, Seonhui**, Son, Minwoo***, and Jung, Kwansue****

Abstract

The Boryeong district, Chungnam western region, is well known as a chronic water-deficiency area; it is thus necessary to ensure that the operational system for the Boryeong Dam emergency facilities is sufficiently resilient to withstand the potential impacts of climate change, in particular irregular droughts with resultant low water inflows and low storage. This study was undertaken to determine the operational flexibility of the Boryeong Dam emergency diversion facilities and their ability to respond to water resources demand, even if the facilities have been operating on a simple open-close release rule, depending on dam storage levels. The precipitation and inflow in Boryeong district were forecasted according to the modelling of RCP (Representative Concentration Pathways) in combination with SSP (Shared Socio-economic Pathways) scenarios. This has led to recommendations for the flexible operation of the Dam's diversion facilities in order to ensure a stable water supply based especially on SSP1-2.6 and SSP5-8.5; i.e., steady growth and dramatic growth scenarios were simulated. The result from these two scenarios was an average diversion rate of 39,600 m³/day and 39,900 m³/day, respectively. This was evaluated as reasonable water resource use because water deficit days were fewer, and the average diversion rate was less than the RCP scenarios.

Key words : Climate Change, Boryeong Dam, Conjunctural Operation, Emergency Water Diversion Facilities, MODSIM

요 지

본 연구에서는 심화되고 있는 기후변화를 고려하여 보령댐 비상도수시설의 운영방법을 단순 Open-close release 형태에서 수자원의 효율적 이용측면에서 유리한 대응단계(관심, 주의, 경계, 심각)별 탄력운영방안에 대하여 연구하였다. 충남서부권지역의 보령시 지역을 대상으로 장래 기후변화 시나리오를 SWAT 모형을 이용하여 강수량과 유입량을 모의한 결과 결정계수 R² 값이 86.3%로 모형적합도가 적절한 것으로 확인되었다. 기후변화 시나리오 RCP 4가지와 SSP 2가지를 대상으로 유량변화를 적용한 보령댐 유역의 용수수급을 MODSIM으로 모의한 결과, 온실가스 저감정책정도에 따른 RCP시나리오 적용시 도수로의 탄력운영 적용방안보다 지속성장(친환경적 성장발전) 또는 고속성장(화석연료 의존 발전) SSP1-2.6, SSP5-8.5 시나리오 적용시 도수로 평균저수량이 39,600 m³/day, 39,900 m³/day로 적고 물부족 일수도 적게 나타났다.

핵심용어 : 기후변화, 보령댐, 연계운영, 비상도수시설, MODSIM

*정회원, K-water 경남서부권지사 수도운영부장(Tel: +82-55-851-5220, Fax: +82-55-851-5219, E-mail: gmim@kwwater.or.kr)

Member, General Manager of Western Gyeongnam office of K-water

**교신저자, 정회원, 충남대학교 공과대학교 토목공학과 박사과정(Tel: +82-42-821-7745, Fax: +82-42-821-8957, E-mail: tjsgml2022@hanmail.net)

Corresponding Author, Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Chungnam University

***충남대학교 공과대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-42-821-5676, Fax: +82-42-825-0318, E-mail: mson@cnu.ac.kr)

Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam University

****정회원, 충남대학교 공과대학교 토목공학과 교수(Tel: +82-42-821-5675, Fax: +82-42-825-0318, E-mail: ksjung@cnu.ac.kr)

Member, Professor, Department of Civil Engineering, Chungnam University

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 강우가 계절별로나 지역별로 편중되어 집중호우 형태로 나타나거나 이상 가뭄현상이 발생함에 따라 효율적 물관리 측면에서나 공평한 물이용 측면, 모두 진보된 기술이 요구되고 있다. 특히 충남서부권 지역은 수자원개발 적지가 없어 불특정한 가뭄에 대한 대책이 요구되는 지역이다. 댐 개발에 수반되는 환경적 부작용을 고려할 때, 대규모 수자원을 개발할 사회적 여건도 조성되지 않고, 지형적으로도 산지가 발달되지 않은 자연환경이므로 신규 수원을 확보하기 위해 2016년 보령댐 비상도수로를 건설하여 운영하고 있다. 보령지역의 한정된 수자원으로는 가뭄시 서해안 지역의 물 산업지구나 지자체 수용가의 물수요를 충족시킬 수 없으므로 2017년~2019년 기간 동안 보령댐 수위 및 저수를 변화에 따라 금강 본류의 물을 보령댐 상류로 도수하여 가뭄대응 조치를 취하였다. Fig. 1에 보령댐 위치를 중심으로 도수시설 위치 및 개요와 금강본류상의 취수지점이 나타나 있다.

보령댐 비상도수로가 건설되고 가뭄상황 마다 금강본류 물을 보령댐 상류로 도수펌핑한 바 있다. 도수로 완공 이후 보령댐 비상도수로 운영Rule은 보령댐의 저수량이 관련법에 의거하여 환경부에서 제정하는 댐용수공급 조정기준의 경계단계의 저수량 곡선(Ministry of Environment, 2019)에 도달시 도수시설을 최대로 운영하고 관심단계 기준저수량 도달시 완전중단하고 있다.

최근들어 기후변화로 인한 홍수와 가뭄이 불특정한 장소와 시간에 빈번히 발생하고 있다. 특히 용수부족으로인한 재정적 피해규모가 증가하고 있기 때문에 가뭄 발생 이전에 물부족에 대처하기 위한 구조적 비구조적 대책을 수립하여야만 한다.

물수급 분석 모형의 적용에 관한 연구는 1900년말부터 수행되었다. Randall et al. (1990)은 선형계획법(LP)을 적용하여 용수판매의 수입과 가압에 소요된 전력비용간의 차이를 목적함수로 하여 수요처별 용수 공급량을 결정하여 가뭄기간중 장기간 물공급계획과 실시간 운영계획을 찾는 연구

를 수행하였다. 1997년에는 혼합정수계획법(MIP)을 사용하여 월단위 물공급 배분계획을 정하는 연구가 행해졌다(Randall et al., 1997).

수자원의 배분을 위해 널리 사용되고 있는 Package Type의 시뮬레이션이나 최적화 모형은 LP 알고리즘을 이용한 WEAP (Water Evaluation and Planning Model)이나 MODSIM (Labadie and Larson, 2000)이 있다(Ryu, 2008). Kang and Koh (2006)은 Custom code를 삽입하여 K-MODSIM을 제어하는 연구를 수행하였는데 K-MODSIM 모형수행 대부분의 과정을 사용자가 Customization을 통해 정의해 줄 수 있다는 것을 보여주었고 Customization 기능을 통해 모형의 유연성을 소개하였다. No et al. (2013)은 새로운 온실가스 시나리오를 구성하였고 금강유역내 기상관측소별로 수문자료를 추출하여 SWAT모형을 이용하여 중권역별 유출량을 산정하였다. 미래 유량변화 시나리오별로 K-ModSim을 이용하여 금강유역의 물수지분석을 수행하였고 용담댐과 대청댐에서의 추가 취수 가능량을 예측하였다. Moon et al. (2013)은 K-WEAP 모형을 이용하여 국내 5대강 권역별 물수급 네트워크를 구축하고 농업용저수지의 공급능력을 감안하여 장래 물부족량을 산정하였다. Lee et al. (2014)은 국내 16개 다목적댐별 신뢰도, 회복도, 취약도를 평가하고 비교한 결과 부안댐이 모든지표에서 가장 낮은 수준으로 평가되었고 이를 향상시키기 위해 댐별 공급계획에 대한 재평가의 필요성을 제안하였다. Choi (2015)가 장래 금강유역의 수자원 계획 수립시 합리적인 계획 수립을 지원할 수 있는 시나리오계획 방법을 제안하였는데 이를 위해 K-WEAP 모형을 활용하여 물과 에너지 관계를 규명하였다. 물 부족 완화 및 해소를 위해 다양한 대안을 제시하였는데 최적 대안 선정에 위해 대안 평가 지속가능성 지수와 에너지 효율 지표를 도입하였다. Kim et al. (2018)은 보령댐을 대상으로 SWAT 모델, 기후변화시나리오 및 다중회귀분석으로 산정한 미래 방류량을 활용하여 기후변화를 반영한 보령댐의 물부족을 평가하였다. 현재 보령댐지역의 비상 용수공급시설로 운영되고 있는 비상도수로를 대상으로 기후변화에 대비하기 위하여 물공급 측면에서 보다 합리적이고 효율적인 대응단계(관심, 주의, 경계,

Fig. 1. Study area of Boryeong Dam Emergency Diversion Facility

심각)를 고려한 도수시설 운영방안에 대한 연구가 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 보령댐유역을 대상으로 유역단위 준분포형 강우-유출모형인 SWAT을 이용하여 미래 기후변화시나리오인 Representative Concentration Pathways (RCP, 대표농도경로)와 Shared Socioeconomic Pathways (SSP, 공통사회 경제경로) 시나리오에 따라 유량변화를 모의하고 MODSIM을 활용하여 미래 저수량 변화에 따라 도수로의 탄력운영방안 도입의 효용성에 대하여 연구하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 SWAT 모형의 개요

장기간의 유출을 분석하기 위해 본 연구에서는 GIS자료를 활용할 수 있고 기존 국내외 연구성과의 인지도를 고려하여 준분포형 강우-유출모형인 SWAT이 적절할 것으로 판단하였다. SWAT 모형은 미국 농무성 농업연구소(USDA Agricultural Research Service, ARS)의 Jeff Arnold 등에 의해 개발된 유역모델(Arnold et al., 1998)로서 Soil and Water Assessment Tool의 약자이다. 대규모의 복잡한 유역에서 장기간에 걸친 다양한 종류의 토양과 토지이용 및 토지관리 상태에 따른 물과 유사 및 농업화학물질의 거동에 대한 토지관리방법의 영향을 예측하기 위하여 1994년 최초로 개발되었다. 일 단위의 모의가 가능한 유역단위의 준분포형 장기 강우-유출모형으로서 수문, 토양유실, 영양물질, 하도추적 부모형으로 구성되어있다. SWAT 모형에서는 토지부분의 수문순환을 정확하게 예측하기 위하여 물수지 방정식에 근거를 두고 지표 유출, 측방 지표하 유출, 침투, 지하수, 수로손실, 증발산 등으로 구성되며 여러 종류의 작물과 토양에서의 다양한 증발산을 반영할 수 있게 유역을 구분한다. 유출량은 사용자가 구분한 소유역으로 분할되고 각 소유역을 HRU (수문반응 단위, Hydrologic Response Unit)로 분할해 유출이 계산되어 유역의 총 유출량을 얻기 위하여 흐름이 추적된다. 물수지 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=0}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

여기서, SW_t 는 최종의 토양수분량(mm), SW_0 는 i 일의 초기 토양수분량(mm), R_{day} 는 i 일에서의 강수량(mm), Q_{surf} 는 i 일에서의 지표유출량(mm), E_a 는 i 일에서의 증발산량(mm), W_{seep} 는 i 일의 토양면으로부터 투수층으로의 투수되는 총량(mm), Q_{gw} 는 i 일의 회귀량(mm), t 는 시간(day)이다.

2.2 MODSIM 모형의 개요

MODSIM 모형은 기존의 네트워크 모형 이론을 기반으로 1978년 미국 Colorado주립대학의 Shafer와 Labadie 교수가 개발한 유역 물관리 모의모형인 MODSIM이 수정, 보완되어

만들어진 것이다. MODSIM은 대상유역이 갖는 물리적 혹은 운영측면의 특성을 반영한 일, 순, 반순, 월 단위 모의운영 모형이다. 이 모형은 하천유역을 일반화된 네트워크로 구축하고 네트워크 흐름 비용 최소화인 Lagrangian Relaxation Algorithm을 사용하여 선형네트워크의 해법을 적용하고 있다. 주요 입력자료는 저수지의 침투, 증발, 발전, 댐 운영, 관개침투, 수로손실, 홍수추적, 관정, 회귀수, 양수에 기인한 하천채류, 그리고 지하수 저류 등이 있으며 이들을 고려한 계산이 가능하다. MODSIM은 대상유역의 과거, 현재 및 미래의 수자원계획을 종합적으로 평가할 수 있는 유역 네트워크 모델로 대부분의 유역관리 문제 해결을 위해 사용할 수 있는 일반화된 모델이며 물수급과정을 Link (하천)와 Node (댐, 용수수요)를 이용하여 네트워크(물수급 모식도)를 구성하여 유역의 물배분 및 저수지 운영 문제를 모의하므로 복잡한 유역시스템에 대해서도 쉽게 구성하여 모의할 수 있는 최적화 모델이다. 네트워크 흐름 최적화 알고리즘을 사용하며 실시간 유역관리 시스템을 위해 Data Base와 직접 접촉할 수 있다(No et al., 2013). 최근 MODSIM 8.0은 MS.NET Framework 기반으로 만들어 졌으며 MS Visual C++/NET (Labadie, 2005)로 코딩되었다. MODSIM의 GUI는 Visual Basic.NET로 개발되었고 source 코드와 소프트웨어로 구성되어있다.

NET Framework의 가장 큰 강점은 특화된 운영률, 입력자료, 출력결과를 MODSIM의 당초 source 코드를 수정하지 않고 제어할 수 있는 기능이 있다는 것이다. 이 제어코드(Customized code)는 Net Framework내에서 통용되는 여러 개의 NET languages로 개발되어졌다. MODSIM의 모든 주요 변수는 Custom code로 제어가능하다. MODSIM의 객체인 GUI는 데이터베이스 관리요소로 연결되어졌고 최적화 모델의 객체프로그램들(Libsim.dll: 선형계획법에 의한 물배분 모의와 최적화 기능), (NetworkUtils.dll: 화면상에서의 네트워크 구성에 대한 라이브러리) 등과 연결되어져 있어 모형사용자가 용수공급 우선순위를 결정단계, 모형결과 표출 등에 효율적으로 이용할 수 있다. MODSIM 최적화 기본 알고리즘은 네트워크 흐름의 질량보전을 유지하는 범위에서 Eq. (2)와 같이 계산기간에 걸쳐 최소비용 네트워크 흐름에 의해 선형 최적화가 이루어진다. 노드 제약조건(Node Constraints)은 Eq. (3)과 같이 어떤 노드에서 유입되는 양과 유출되는 양의 합은 같음을 의미하며, 아크 제약조건(Arc Constraints)은 Eq. (4)와 같이 모든 아크나 링크에 대한 범위의 상한 값과 하한 값을 갖는다(K-water, 2006).

$$\text{minimize } \sum_{k \in A} c_k q_k \quad (2)$$

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{j \in I_i} q_j = 0 \text{ for all nodes } i \in N \quad (3)$$

$$l_{kt} \leq q_k \leq u_{kt} \text{ for all links } k \in A \quad (4)$$

수생태계 등을 고려하여 댐-보연계운영협의회의 의결을 거쳐 탄력적으로 운영하고 있다. 보령댐을 비롯한 충남서부권 지역은 신규로 용수공급원을 확보하기 어려운 지역으로서 현재의 금강본류의 물을 도수하는 용수공급시스템을 최적화할 필요가 있다.

3.2 모형구축

3.1 대상유역

SWAT모형은 4개의 입력자료로 구성되는데 먼저, 유역분할을 위한 지형자료인 수치표고모형(DEM)은 국토지리정보원에서 30 m × 30 m의 격자크기로 제공받아 사용하였다. 유역의 토지이용현황은 환경부에서 제공하는 중분류 토지피복도를 사용하였으며 토양도는 농촌진흥청에서 제공하는 1:25,000 축척의 정밀토양도를 적용하였다. SWAT모형의 기상자료 입력을 위한 자료구성은 보령댐유역 인근의 기상청 관할 관측소인 보령과 부여 기상관측소 2개소의 33개년(1988년~2020년) 기온과 강우량을 적용하였다. 모형분석시 선택한 공식 및 방법으로는 강우분포 Skewed Normal, 잠재증발산량 Penman Monteith Method, 하도추적 Muskingum Method, 지표유출 SCS유출곡선법을 선택하여 분석하였다.

Fig. 2에서 보논비와 같이 보령댐 유역은 총 21개의 소유역으로 분할되었고 보령댐이 위치한 지점의 소유역은 16번 유역이다. 분석기간 동안의 유입량은 보령댐 실측유입량을 입력하였고 댐에서의 용수공급량은 댐 상·하류로 구분하여 보령댐내 취수탑을 통해서 공급되는 생·공용수와 댐하류로 공급되는 생·공용수, 농업용수, 하천유지용수로 구분된다.

도수로의 모의운영 분석기간은 2010년 10월 1일 부터

2019년 9월 30일까지이며 보령댐으로부터 공급되는 용도별 월별 수량은 Table 1과 같이 댐내 취수탑으로부터 취수하여 공급하는 수량과 댐하류로 방류하여 공급하는 수량으로 구분되어 있으며 생·공용수는 매일 2.87 m³/s, 농업용수는 4월~9월동안 0.16 m³/s 한도내 가변적으로, 하천유지용수는 월별 0.36 m³/s를 공급하고 있다(K-water, 2020). 보령댐 비상도수로의 분석시나리오별 운영조건은 Table 2의 보령댐 비상도수로의 탄력운영시나리오와 같이 가뭄위기 경계수준별로 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수별로 차별화하여서 구성하였다. 가뭄위기 경계수준별로 모의운전을 위해 계획공급량은 댐 용수공급 조정기준에 의거하여

경계단계부터 하천유지용수와 농업용수를 점차 절감 공급하는 것으로 가정하였다. 도수로 가동율은 2015년도 충남 서부권 급수조정 시행시 생·공용수 공급 감축계획 사례(20%)를 반영하여 도수로의 시설용량(115천 m³/day)의 20%씩 관심단계~심각단계까지 등분(20~100%)하여 선제적으로 탄력운영·공급하는 것으로 가정하였으며, Fig. 3과 같이 물공급네트워크를 구성하였다. 다만, 현재의 보령댐도수로 운영은 Fig. 4의 보령댐 저수량이 가뭄위기 경계수준 중, 경계단계에 해당되는 시점에서 가동을 시작하여 금강 원수를 보령댐에 보충하고 보령댐 저수량이 Fig. 4의 관심단계 기준 저수량에 도달하면 가동이 종료된다.

Fig. 3. Water Supply Network of Boryeong Dam

Fig. 4. Criteria Storage Quantity Curves of Contingency Phases of Boryeong Dam, Dam Water Supply Criteria (Ministry of Environment, 2019)

Table 1. Each Average Usage Water Scale (K-water, 2020)

Classification		Domestic & Industrial water	Agricultural water (Apr. ~ Sep.)	Maintenance water	Total
Monthly average	In reservoir (m ³ /s)	2.73	0.00	0.00	2.73
	Dam downstream (m ³ /s)	0.14	0.16	0.36	0.66
Total (m ³ /s)		2.87	0.16	0.36	3.39

Table 2. Scenario of Operation Rule of Boryeong Dam Emergency Diversion Facility

Drought Crisis levels	Water Supply Boundary Condition				Diversion Facility Operation Rate
	Domestic Water	Industrial Water	Agricultural Water	Maintenance Water	
Normal	100%	100%	100%	100%	-
Normal~Attention	100%	100%	100%	100%	20%
Attention~Caution	100%	100%	100%	100%	40%
Caution~Warning	100%	100%	100%	50%	60%
Warning~Serious	100%	100%	80%	50%	80%
Serious	100%	100%	50%	-	100%

Table 3. The Value Range for Calibrated Parameter (Kim and Kim, 2017; Kim et al., 2018)

Parameters		Definition	Adjustment	Fitted Value
.gw	ALPHA_BF	Base flow alpha factor (days)	replace	0.576
	GW_DELAY	Groundwater delay (days)	replace	52.963
.mgt	CN2	SCS runoff curve number	added	0.042
.hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	replace	0.541
	CANMX	Maximum canopy storage	replace	1.352
	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	replace	6.225
	LAT_TTIME	Lateral flow travel time	replace	5.313

3.2.3 MODSIM 모형구축

도수로운영방안에 따른 용수수급분석을 위하여 MODSIM 으로 보령댐계통 광역상수도를 중심으로 금강분류에서 도수평면하여, 보령댐에서 용수를 공급하는 모식도를 Fig. 3과 같이 구성하였다. 금강분류 취수장은 백제보하류 6.7 km지점에 위치하고 있으며 도수 시설용량은 115천 m³/day이고 도수로는 관로 D=1,100 mm, L=21.9 km이다.

3.2.4 기후변화 시나리오

이 연구에서 적용한 Representative Concentration Pathways (RCP, 대표농도경로) 시나리오는 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 기후변화에 관한 정부 간 협의체) 5차 평가보고서(AR5: Fifth Assessment Report, 2014)에서는 인간 활동이 대기에 미치는 복사량으로 온실가스 농도를 정하였고 같은 복사강제력에 대해 사회-경제 시나리오로 구분되는 의미에서 ‘대표(Representative)’이며 온실가스 배출량 시나리오의 시간에 따른 변화를 강조하기 위해 ‘경로(Pathways)’라고 한다. SSP (Shared Socioeconomic Pathways, 공통사회 경제경로)는 IPCC 6차 평가보고서를 위해 2100년 기준 복사강제력 강도와 함께 미래 사회경제변화를 기준으로 기후변화에 대한 미래의 완화와 적응 노력에 따라 시나리오가 구별되며 인구통계, 경제발달, 복지, 생태계 요소, 자원, 제도, 기술발달, 사회적 인자, 정책을 고려한다. 기상자료는 일강수량(mm), 최고 및 최저기온(°C)이 필요하며 보령댐유역

인근의 보령, 부여 기상관측소의 기후변화 시나리오를 취득하기 위해 기상청 기후정보포털(<http://www.climate.go.kr>)에서 제공하는 RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0, RCP 8.5 4가지 시나리오와 화석연료 사용정도가 가장 상반되는 시나리오 SSP1-2.6, SSP5-8.5 2가지로 각 시나리오에 따른 관측소별 미래기상자료를 구축하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 SWAT모형의 검 · 보정

SWAT 모형의 안정화를 위해 warm up을 2년(1988년~1989년)으로 설정하였으며 모의기간을 1990년부터 시작하였다. 2001년~2004년을 모형의 안정화 기간으로 사용하고 2005년~2008년을 모형의 보정기간으로 설정하여 검 · 보정을 위한 모형의 매개변수값을 Table 3에 나타내었다.

Table 3은 본 연구에서 선정한 매개변수이다. 기존 연구(Kim and Kim, 2017; Kim et al., 2018)에서 동일한 유역과 유량변화에 영향을 미치는 매개변수로 연구된 바 있기에 저류량과 관련한 매개변수를 제외한 총 7개를 선정하였으며 SWAT-CUP을 수행하여 조정하였다.

지표유출과 관련한 변수는 CN2 (SCS유출곡선지수, SCS runoff curve number), CANMX (산림 최대 흡수량, Maximum canopy storage), 증발산과 관련한 변수는 ESCO (토양증발 보상계수, Soil evaporation compensation factor), 토양수분과

중간유출과 관련한 변수는 SLSOIL (토양층의 기울기, Slope length for lateral subsurface flow), LAT_TIME (중간유출 지연계수, Lateral flow travel time), 기저유량과 지하수와 관련한 매개변수는 ALPHA_BF (기저유량감소계수, Baseflow alpha factor), GW_DELAY (지하수 지연시간, groundwater delay time)이다.

모형의 효율성 검증을 위한 지수는 Nash and Sutcliffe (1970)에 의해 제안된 모형효율성지수(Efficient Index, EI)를 사용하였다. EI는 모의값과 관측값이 일치하면 1.0이며, 값이 0과 1사이에 있으면 모의값을 사용하는 것이 관측값의 평균을 사용하는 것보다 좋은 결과를 얻을 수 있고, 0보다 작으면 모형의 모의 결과가 나쁘거나 관측 자료가 일관성이 없음을 의미한다(Nash and Sutcliffe, 1970). 모형의 상관성을 판단하기 위한 지수는 결정계수(Coefficient of Determination, R^2)와 제곱근평균오차(Root Mean Squar Error, RMSE)를 사용하였다. Ye et al. (2008)은 대청댐 유역의 유출값을 R^2 와 EI값으로 모형 적합성을 검토하였고 Chung et al. (1999)은 결정계수(R^2) 0.5 이상, Ramanarayanan et al. (1997)은 결정계수(R^2)가 0.5 이상이고 모형효율성지수(EI)가 0.4 이상이면 모형이 자연현상을 잘 모의한다고 제안하였다.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})(P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2$$

$$EI = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{n}}$$

여기서, P_i 는 시간에서의 모의유량, O_i 는 시간에서의 관측 유량, $\bar{P}$ 는 전체모의시간의 모의유량평균, $\bar{O}$ 는 전체모의시간의 관측유량평균, n 은 시간 간격개수이다.

결정된 매개변수의 값을 보령댐유역에 변화시켜 유량을 보정한 결과 Table 4와 같이 R^2 는 0.88, EI는 0.63, RMSE는 4.13으로 분석되어 상관성이 있는 것으로 나타났고 모형 효율성지수 또한 0.5 이상으로 관측값을 잘 반영하는 것으로 판단된다. 극치값을 제외하고는 전체적으로 관측값을 잘 따랐으며 유역이 비교적 작은 특성을 고려하였을 때 전체적으로 잘 보정된 것으로 판단된다.

4.2 대상유역 미래유출 예측

보령댐으로 유입되는 2021년부터 2100년까지 80년간 미래 예측유량을 과거 2001년부터 2010년까지 10년간 평균한 연총합유량과의 비교를 한 결과 전기간 유량값이 감소하였다. Fig. 5(a)에서 보논바와 같이 6가지 시나리오가 2021년부터 2040년 사이에서 감소율을 보였는데 Table 5에서 특히 RCP 4.5 시나리오가 2021년부터 2030년 사이에 42.50% 감소하는 것으로 강우의 감소가 유량의 감소로 영향을 미친 것으로 판단된다.

미래예측기간을 초기(2021년~2040년), 중기(2041년~2070년), 후기(2071년~2100년)로 나누어 월별 유출량을 분석한 결과 Fig. 6과 같이 모든 시나리오에서 여름에서 초가을(7

Table 4. Calibration and Validation Results for Daily Runoff

Period	R^2	EI	RMSE
Calibration period (2001y-2004y)	0.8331	0.7187	3.1660
Validation period (2005y-2008y)	0.8856	0.6392	4.1348

Table 5. Outlook of Flow and Increase Rate

Period	RCP 2.6		RCP 4.5		RCP 6.0		RCP 8.5		SSP 1-2.6		SSP 5-8.5	
	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)	Runoff (m ³ /sec)	Rate of change (%)
2001y-2010y	1,453.66		1,453.66		1,453.66		1,453.66		1,453.66		1,453.66	
2021y-2030y	1,038.35	-28.57	835.85	-42.50	910.57	-37.36	1,024.06	-29.55	894.84	-38.44	931.29	-35.93
2031y-2040y	1,223.08	-15.86	890.99	-38.71	1,188.83	-18.22	943.15	-35.12	1,032.45	-28.98	880.80	-39.41
2041y-2050y	860.88	-40.78	1,311.72	-9.76	1,092.50	-24.84	949.71	-34.67	1,066.33	-26.64	992.43	-31.73
2051y-2060y	1,120.70	-22.90	1,157.37	-20.38	967.10	-33.47	1,013.14	-30.30	1,141.85	-21.45	1,109.70	-23.66
2061y-2070y	1,081.52	-25.60	1,336.66	-8.05	1,181.78	-18.70	1,062.68	-26.90	1,207.95	-16.90	1,138.86	-21.66
2071y-2080y	1,069.38	-26.44	1,116.97	-23.16	1,253.54	-13.77	1,170.80	-19.46	1,123.89	-22.69	1,236.13	-14.96
2081y-2090y	1,013.99	-30.25	1,245.07	-14.35	1,260.22	-13.31	1,041.02	-28.39	1,091.48	-24.91	1,121.91	-22.82
2091y-2100y	982.48	-32.41	959.46	-34.00	1,002.62	-31.03	1,240.29	-14.68	1,054.47	-27.46	1,282.29	-11.79

(a) Flow

(b) Precipitation

Fig. 5. Rate of Flow and Precipitation Outlook

(a) RCP 2.6

(b) RCP 4.5

(c) RCP 6.0

(d) RCP 8.5

(e) SSP1-2.6

(f) SSP5-8.5

Fig. 6. Monthly Flow Outlook

월~9월) 사이에 유량이 감소하고 늦가을에서 겨울철(11월~1월)의 유량이 증가할 것으로 예측되었다. SSP5-8.5에서는 여름을 제외한 봄, 가을, 겨울에서 후기로 갈수록 유량이 증가하였다.

Special Report on Emission Scenario (SRES, 미래사회구조 중심) 시나리오 중 A1B시나리오를 적용하여 댐유역의 월별유량을 예측한 기존의 연구(Park et al., 2011)에서는 계절별 변화 경향성을 분석한 결과 가을철의 유량이 증가하고 여름철의 유량이 지금보다 감소하여 나타나는 것으로 예측하였으며 본 연구에서도 마찬가지로 여름의 유량이 감소되어 기후변화에 따른 홍수기 수량변동이 클 것으로 예상되고 과거의 강우패턴과는 다르게 나타날 것으로 전망된다.

4.3 보령댐 비상도수로 용수수급 분석

4.3.1 도수로 모의운영 시나리오

도수로 가동율을 도수로시설용량(115천 m³/day)의 0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 구분하였다. 현재 적용되고 있는 다목적댐의 대응단계별 용수공급 조정기준에 의하면 경제단계에서는 농업용수 실사용량의 20~30%를 감량하여 공급하고 심각단계에서는 생활용수와 공업용수 실사용량의 20%를 감량하여 공급하게 되어 있다. 그러므로 도수로의 탄력운영 가동율을 20%씩 단계적으로 증량하는 것으로 모의운영 시나리오를 구성하였다. 대응단계가 정상상태일 경우에는 도수로를 가동하지 않는 것으로 모의하였고 보령댐 자체유입량만으로 생활용수, 공업용수, 농업용수 및 하천유지용수를 전량 공급하는 것으로 모의하였다.

보령댐의 대응단계별 기준저수량 곡선은 Fig. 4와 같으며 보령댐 계획홍수위시 저수량은 97.8백만 m³, 상수만수위시 저수량은 88.7백만 m³, 저수위시 저수량은 6.1백만 m³이다. 정상상태~관심상태일 경우 도수로 가동율을 20% 운영하는 것으로 하였고 생활용수, 공업용수, 농업용수 및 하천유지용수는 전량 공급하는 것으로 모의하였다.

관심상태~주의상태일 경우에는 도수로가동율을 40%로 운영하는 것으로 하였고 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하

천유지용수는 전량 공급하는 것으로 모의하였다. 주의상태~경계상태일 경우에는 도수로 가동율을 60%로 운영하는 것으로 하였고 생활용수, 공업용수, 농업용수는 전량 공급하고 하천유지용수는 50%만 공급하는 것으로 모의하였다. 경계상태~심각상태일 경우에는 도수로 가동율을 80%로 운영하여 생활용수, 공업용수는 계획공급량을 전량 공급하고, 농업용수는 계획공급량의 80%, 하천유지용수는 계획공급량의 50%를 공급하는 것으로 모의하였다. 왜냐하면 2015년 가뭄상황시 용수공급사례(Jung et al., 2016)를 참조하였고 물이용자를 우선 고려하였기 때문이다.

심각상태일 경우에는 도수로 가동율을 100%로 운영하여 생활용수, 공업용수는 계획공급량을 전량 공급, 농업용수는 계획공급량의 50%, 하천유지용수는 공급하지 않는 것으로 모의하였다.

4.3.2 과거 수문년 기간 모의운영

도수로 모의운영 시나리오를 적용하여 2010년 10월 1일부터 2019년 9월 30일 기간 동안 실측 일단위 유입량을 대상으로 Table 6의 case별로 보령댐의 물공급 상황을 모의하였다. Table 2의 탄력운영방안을 첫 case로 모의하였다. 두 번째 case는 첫 case 모의 결과로 나타난 일평균 도수량을 정량으로 하여 상시 도수하는 방안이고 세 번째 case는 도수로 시설용량의 50%인 57,500 m³/day를 정량으로하여 상시공급하는 방안이다. 네 번째 case는 미 도수조건으로 하여 댐 자체유입량만을 가지고 용수공급하는 방안이며, 다섯 번째 case는 경제, 심각단계에서만 도수로 시설용량인 115,000 m³/day를 공급하는 방안이다. 각 case별로 모의시 용수공급조건은 동일하게 Table 2의 용수공급조건을 적용하는 것으로 하였고 각각의 모의결과를 비교하였다. Fig. 3의 물공급 네트워크를 기반으로 모의한 결과는 Table 6과 같으며 각 운영방안별 보령댐 저수량곡선을 Fig. 7과 같이 대응단계 경계시 저수량곡선과 대비하여 도시하였다. 5가지의 경우를 모의운영한 결과, 경제단계에서부터 도수를 전량 시행하는 조건이 가장 적은 도수량으로 물부족이 발생하지 않기 때문에 가장 효율적인 것으로 나타났다. 대응단계별로 도수량을 증량하는

Table 6. Boryeong Dam MODSIM Simulation Result (Oct. 1, 2010 ~ Sep. 30, 2019)

Items	Simulation cases				
	Flexible Diversion	Equal Diversion (1) (29,300 m ³ /day)	Equal Diversion (2) (57,500 m ³ /day)	No Diversion	Full Diversion (Warning~Serious phase) ※ No Diversion (Normal~Warning phase)
Domestic, Industrial, Agricultural Water Shortage (million m ³)	-	9,838	-	41,638	-
Average daily diversion (m ³ /day)	29,300	29,300	57,500	-	20,800
Water Supply Safety (Water Supply Failure days)	100% (-)	96.9% (101)	100% (-)	91.8% (270)	100% (-)

Fig. 7. Boryeong Dam Storage Curve (Oct. 1, 2010 ~ Sep. 30, 2019)

Table 7. Water Supply Safety of Operation Rules in Each RCP and SSP Scenario

Scenario & Classification		Simulation cases			
		Flexible Diversion	Equal Diversion (2) (57,500 m ³ /day)	No Diversion	Full Diversion : Warning~Serious phase ※ No Diversion : Normal~Warning phase
RCP 2.6	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	36.9	145.8	1,090.0	51.8
	Average daily diversion (m ³ /day)	48,500	57,500	-	42,400
	Water Supply Safety (Water Supply Failure Days)	99.0% (290)	97.0% (864)	83.4% (4,906)	98.5% (442)
RCP 4.5	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	94.2	296.7	1,128.8	108.3
	Average daily diversion (m ³ /day)	46,400	57,500	-	41,000
	Water Supply Safety (Water Supply Failure Days)	97.3% (774)	94.0% (1,769)	82.7% (5,101)	97.0% (881)
RCP 6.0	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	39.3	111.9	973.5	51.8
	Average daily diversion (m ³ /day)	42,800	57,500	-	38,000
	Water Supply Safety (Water Supply Failure days)	98.9% (298)	97.7% (654)	85.3% (4,337)	98.6% (397)
RCP 8.5	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	24.0	68.7	961.8	32.1
	Average daily diversion (m ³ /day)	43,700	57,500	-	38,700
	Water Supply Safety (Water Supply Failure Days)	99.3% (201)	98.5% (422)	85.7% (4,204)	99.0% (271)
SSP1 -2.6	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	0.8	29.3	669.7	1.1
	Average daily diversion (m ³ /day)	39,600	57,500	-	31,800
	Water Supply Safety (Water Supply Failure Days)	99.9% (10)	99.2% (208)	88.1% (3,517)	99.9% (13)
SSP5 -8.5	Water Shortage (million m ³) D.I & Agricultural water	0.1	35.6	724.3	6.4
	Average daily diversion (m ³ /day)	39,900	57,500	-	33,700
	Water Supply Safety (Water Supply Failure Days)	99.9% (2)	99.0% (270)	87.1% (3,811)	99.7% (74)

탄력운영방안이 다음으로 효율적인 방안으로 분석되었다. 이후 장래 미래기후변화 시나리오에 탄력운영방안을 적용하여 모의하였다.

4.4 미래 기후변화 상황에서의 모의분석

RCP 2.6, 4.5, 6.0, 8.5 시나리오와 SSP1-2.6과 SSP5-8.5의 시나리오별로 모의한 미래 일유출량(2019년 10월 1일~2100년 9월 30일)을 대상으로 Table 2의 탄력운영 조건과 도수로 시설용량의 50%에 해당하는 57,500 m³/day를 상시도수하는 조건, 미도수조건, 그리고 경계, 심각단계에서만 115,000 m³/day를 도수하는 방안으로 구분하여 Table 2의 용수공급조건을 토대로 물공급하는 것으로 모의하여 그 결과를 Table 7에 정리하였다.

대응단계별 도수로의 탄력운영방안이 상대적으로 높은 이수안전도와 적은 물부족량을 보였다. 특히, SSP1-2.6과 SSP5-8.5 시나리오에서는 탄력운영방안이 높은 이수안전도를 보인 것으로 분석되었다. 그러므로 장차 기후변화에 대비하여 대응 단계별 선제적 탄력운영방안이 수자원의 효율적 이용측면에서 유리한 것으로 나타났다. 다만, 온실가스 저감정책 정도에 따른 RCP시나리오 적용시 도수로의 탄력운영 적용방안보다 지속성장 또는 고속성장의 시나리오인 SSP1-2.6, SSP5-8.5 적용시 도수로 평균도수량이 39,600 m³/day, 39,900 m³/day로 적고 물부족 일수도 적게 나타나는 것으로 분석되었다. 또한, 경계, 심각단계에서 도수하는 방안이 도수를 하지 않고 댐 자체유입량에 의존하는 경우와 비교할 때, 이수안전도가 높은 것으로 나타났다.

5. 요약 및 결론

과거 실측유입량을 대상으로 보령댐 비상도수로를 모의 운영한 결과 Table 2와 같이 가정된 용수공급조건하에서 경계단계에서부터 도수를 시행하는 조건이 가장 적은 도수량으로 물부족이 발생하지 않기 때문에 가장 효율적인 것으로 나타났으며 일정량을 상시 도수하는 도수로운영방안보다 선제적 탄력운영방안 도입이 효율적인 것으로 모의되었다.

미래 기후변화 시나리오별 도수로 모의운영결과 대응단계별로 선제적으로 도수로를 탄력운영하는 방안이 높은 이수안전도를 보이는 것으로 분석되었다. 또한 도수로 건설 이후 도수 효과가 있는 것으로 모의 되었다.

이 연구결과를 요약하면 첫째, 도수로 건설효과는 있는 것으로 나타났으며 둘째, 도수로를 대응단계별로 선제적으로 탄력운영하는 방안이 장차 효율적인 수자원 이용측면이나 장래 가뭄 Emergency Action Plan (EAP) 수립, 기후변화에 대비한 시설운영에 필요한 것으로 나타났다. 또한 도수로의 선제적 탄력운영방안이 용수이용의 효율성을 제고함과 동시에 도수에 따른 전력비용도 추가로 절감할 수 있을 것으로

기대하며 도수로 인한 금강분류와 보령댐의 수질변화에 대한 연구도 필요하다.

감사의 글

이 성과는 정부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(No. 2019K1A3A1A0508790112).

References

- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., and Williams, J.R. (1998). Large Area Hydrologic Modeling and Assessment Part I: Model Development. *Journal of the American Water Resources Association*, Vol. 34, No. 1, pp. 73-89.
- Choi, S.J. (2015). *Development and Evaluation of Water Resources System Assessment Methodology based on Scenarios and Energy Efficiency*. Ph.D. dissertation, Korea University, Seoul, Korea.
- Chung, S.W., Gassman, P.W., Kramer, L.A., Williams, J.R., and Gu, R. (1999). Validation of EPIC two watersheds in southwest Iowa. *Journal of Environmental Quality*, Vol. 28, No. 3, pp. 971-979.
- Jung, W.H., Noh, S.H., and Kim, Y.I. (2016). *Boryeong Dam Water Supply Capacity Evaluation and Draught Action Plan*. ChungNam Institute, pp. 53-57.
- Kang, S.O., and Koh, I.H. (2006). K-MODSIM 8.0 Control with Custom code. *Magazine of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 48, No. 3, pp. 50-54.
- Kim, D.R., and Kim, S.J. (2017). A Study on Parameter Estimation for SWAT Calibration Considering Stream flow of Long-term Drought Periods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 59, No. 2, pp. 19-27.
- Kim, W.J., Jung, C.G., Kim, J.U., and Kim, S.J. (2018). Water shortage assessment by applying future climate change for Boryeong dam using SWAT. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 51, No. 12, pp. 1195-1205.
- K-water. (2006). *K-MODSIM Users' Manual Version 1.0*.
- K-water. (2020). *Water Management Guidebook*.
- Labadie, J.W., and Larson, R. (2000). *MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual*. Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, Ft. Collins, CO.
- Labadie, J.W. (2005). *MODSIM: River basin management decision support system*. Watershed Models, CRC

- Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Lee, D.R., Moon, J.W., and Choi, S.J. (2014). Performance Evaluation of Water Supply for a Multi-purpose Dam by Deficit-Supply Operation. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 47, No. 2, pp. 195-206.
- Ministry of Environment. (2019). *Dam Water Supply Management Criteria*.
- Moon, J.W., Lee, D.R., and Choi, S.J. (2013). Water Shortage Estimation by Drought Frequencies in National Water Plan. *The Korea Spatial Planning Review*, Vol. 78, pp. 105-120.
- Nash, J.E., and Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, Vol. 10, pp. 282-290.
- No, S.H., Jung, K.S., Park, J.H., and Ryoo, K.S. (2013). Water Supply Change Outlook for Geum River Basin Considering RCP Climate Change Scenario. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 46, No. 5, pp. 505-517.
- Park, J.H., Kwon, H.H., and No, S.H. (2011). Outlook of Discharge for Daecheong and Yongdam Dam Watershed Using A1B Climate Change Scenario Based RCM and SWAT Model. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 44, No. 12, pp. 929-940.
- Randall, D., Mark, H.H., and Jeff, R.W. (1990). Drought management of existing water supply system. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 116, No. 1, pp. 1-20.
- Randall, D., Cleland, L., Kuehne, C.S., Link, G.W., and Sheer, D.P. (1997). Water supply planning simulation model using mixed-integer linear programming “engine”. *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 123, No. 2, pp. 116-124.
- Ramanarayanan, T.S., Williams, J.R., Dugas, W.A., Hauck, L.M., and McFarland, A.M.S. (1997). Using APEX to identify alternative practices for animal waste management. *ASAE Annual International Meeting*. Minneapolis, MN, ASAE paper, No. 97-2209.
- Ryu, T.S. (2008). *An Optimal Conjunctive Model Development of the Looped Water Supply System with Multiple Sources-Using K-ModSim and EPAnet model*. Ph.D. dissertation, Chungbuk National University, Cheongju, Korea
- Ye, L., Yoon, S.W., and Chung, S.W. (2008). Application of SWAT for the Estimation of Soil Loss in the Daecheong Dam Basin. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 41, No. 2, pp. 149-162.

Received	■	April 27, 2021
Revised	■	April 28, 2021
Accepted	■	May 7, 2021